

Método bayesiano de estimación del potencial de reducción de costes de la accidentalidad en los tramos de una red de carreteras

José María Pardillo Mayora

Profesor Titular de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid, España

Rafael Jurado Piña

Profesor Titular de Universidad (i), Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

La directiva europea sobre gestión de la seguridad de las infraestructuras viarias establece el requerimiento de implantar un procedimiento de clasificación de los tramos de la red en función del ahorro potencial en costes derivados de los accidentes en las carreteras que forman parte de la Red Transeuropea. El potencial de mejora de la seguridad debe reflejar la reducción en coste de accidentalidad que podría alcanzarse a través de medidas de mejora de la infraestructura y puede estimarse como la diferencia entre el coste por km de la accidentalidad del tramo durante el período considerado y el coste esperado para carreteras del mismo tipo que dispongan de las condiciones de seguridad alcanzables mediante actuaciones preventivas de mejora de las infraestructuras. En la ponencia se describe un procedimiento para mejorar la precisión de la estimación del potencial de reducción de la accidentalidad en los tramos de una red de carreteras a partir de la calibración de modelos lineales generalizados de estimación de la frecuencia de accidentes y de su combinación con la información registrada de accidentalidad aplicando un procedimiento bayesiano empírico.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Entre otras medidas destinadas a mejorar la seguridad vial en las carreteras que forman parte de la Red Transeuropea de Transporte, la Directiva 2008/96/CE sobre gestión de la seguridad de las infraestructuras viarias establece el requerimiento de implantar un procedimiento de clasificación de los tramos de la red en función del ahorro potencial en costes derivados de los accidentes. De la clasificación de la seguridad de la red debe derivarse una lista prioritaria de tramos en los que se espera que una mejora de la infraestructura sea altamente efectiva.

En 2003 las Administraciones de Carreteras de Francia y Alemania acordaron desarrollar una metodología común de gestión de las medidas de seguridad vial en carreteras existentes a partir de los procedimientos que estaban poniéndose a punto a tal efecto en ambos países. La metodología resultante fue presentada en foros internacionales bajo la denominación de Network Safety Management (NSM) y puede considerarse el antecedente directo del procedimiento de clasificación del potencial de mejora de la seguridad requerido por la directiva europea.

Mientras que en Francia el NSM se considera un procedimiento global de gestión de las medidas de mejora de la seguridad vial en las carreteras en servicio que incluye las

medidas en tramos de concentración de accidentes, en Alemania se plantea como un proceso complementario del de tratamiento de puntos negros.

En la metodología NSM, el parámetro clave para evaluar el funcionamiento de los tramos desde el punto de vista de la seguridad es el denominado potencial de mejora de la seguridad (Ganneau y Lemke, 2007). El potencial de mejora de la seguridad mide el ahorro potencial en coste de accidentalidad que podría alcanzarse mediante la aplicación de medidas de mejora de la seguridad. Se define como el coste de la accidentalidad por km que podrían ahorrarse si el tramo tuviese las mejores condiciones de seguridad. La ventaja de utilizar el potencial de mejora de la seguridad como referencia es que permite valorar conjuntamente distintos tipos de carreteras con distintos volúmenes de tráfico en los que los niveles alcanzables de accidentalidad son diferentes.

En este método se emplean los costes de los accidentes en lugar del número de accidentes como variable de referencia porque esto permite ponderar las cifras de accidentes en función de su gravedad. Los costes de los accidentes se calculan multiplicando el número de accidentes de cada nivel de gravedad registrados por la media del coste por accidente calculada a nivel nacional. El coste por km de los accidentes registrados debe compararse con el coste esperado para carreteras del mismo tipo con las mejores condiciones de seguridad.

Finalmente, el potencial de seguridad se calcula como la diferencia entre el coste de la accidentalidad por km del tramo durante el período de revisión y el coste esperado para carreteras del mismo tipo con las mejores condiciones de seguridad. Los itinerarios, se ordenan por su potencial de mejora de la seguridad obteniéndose una relación ordenada de los tramos o itinerarios de la red en los que existe una necesidad de mejora de la seguridad y en los que se pueden conseguir importantes reducciones de los costes de los accidentes, lo que proporciona la base para la realización de estudios detallados para definir las posibles medidas de mejora de la seguridad.

2. PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS TRAMOS DE LA RED

Como consecuencia de lo prescrito en la Directiva 2008/96/CE, el procedimiento de clasificación de la seguridad de la red debe referirse al ahorro potencial en costes derivados de los accidentes alcanzable mediante actuaciones de mejora de la infraestructura. Para su aplicación es necesario llevar a cabo las siguientes actividades (Pardillo, 2009):

- a) Tramificación de la red en tramos homogéneos con arreglo a factores relacionados con la seguridad, como tipo de carretera, volumen del tráfico y tipología del tráfico y clasificación de los tramos en categorías homogéneas.
- b) Estimación de los costes de la accidentalidad por km para cada tramo de la red en sus condiciones presentes a partir de los registros de accidentes en un período de 3 a 5 años y de la determinación de los costes sociales medios por accidente en el conjunto de la red en función de su gravedad.
- c) Estimación del potencial de mejora de la seguridad alcanzable en cada tramo de la red mediante actuaciones de mejora de la infraestructura.

- d) Selección de los tramos en los que la reducción potencial de costes de la accidentalidad resulte más elevada para la realización de estudios de detalle. La denominación prevista para estos tramos es la de tramos con alto potencial de mejora de seguridad vial (TAPMS).
- e) Estudio de los TAPMS por un equipo de expertos para definir las medidas de mejora de la seguridad vial adecuadas. El objeto de estos estudios es llegar a identificar las disfunciones de la carretera para definir las medidas de mejora de la seguridad más adecuadas. Los estudios deben complementarse con una estimación de las reducciones de accidentalidad alcanzables y los costes de la adopción de las medidas, lo que permite establecer el orden de prioridades para su ejecución.
- f) Priorización, programación, ejecución y seguimiento de las actuaciones preventivas de mejora de la infraestructura en TAPMS.

En principio, la estimación de la reducción potencial de costes de la accidentalidad se realiza por comparación del coste por km de los accidentes registrados en cada tramo con un valor de referencia para cada categoría de carreteras que corresponde al coste por km de la accidentalidad en los tramos en los que se dan las mejores condiciones de seguridad alcanzables a través de medidas preventivas de mejora de la seguridad vial. Para determinarlo, los costes de los accidentes registrados en cada tramo se obtendrán multiplicando el número de accidentes de cada nivel de gravedad registrados en el tramo por la media del coste social por accidente calculada en el conjunto de tramos para la categoría correspondiente.

La aplicación del procedimiento exige que se determinen los costes sociales de las víctimas de los accidentes de tráfico en función de su gravedad. Una de las prescripciones de la directiva es que se establezcan periódicamente estos costes a nivel de red.

3. METODOLOGÍA BAYESIANA DE ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE COSTES DE LA ACCIDENTALIDAD

Con el fin de mejorar la precisión en la determinación del potencial de reducción costes de la accidentalidad, se ha planteado un procedimiento bayesiano empírico de estimación de la frecuencia de la accidentalidad en los tramos de la red en el que se combinan las estimaciones de frecuencia de la accidentalidad en cada tramo en función de sus características y las derivadas de los accidentes registrados en el tramo en concreto.

La aplicación del procedimiento bayesiano permite aumentar significativamente la precisión de las estimaciones en carreteras en servicio. La estimación de la accidentalidad combina la estimación “a priori” obtenida a partir de un modelo de regresión lineal generalizado binomial negativo ajustado en el conjunto de tramos semejantes al que pertenece el que es objeto de la estimación y los registros de accidentalidad en el tramo.

En el marco del proyecto DISCAM desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil - Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid con una subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento para la realización de proyectos de I+D+i ligados al desarrollo del PEIT (Pardillo, Jurado et al., 2009) se desarrolló un procedimiento de aplicación para soportar la evaluación de los

efectos debidos a las medidas de seguridad vial llevadas a cabo en una carretera de los atribuibles a las oscilaciones aleatorias de la accidentalidad o a la evolución de otros factores concurrentes en la evolución de los niveles de seguridad. Este procedimiento permite combinar la estimación “a priori” obtenida a partir de un modelo de regresión multivariante binomial negativo ajustado en el conjunto de tramos semejantes al que pertenece el que es objeto de la estimación y los registros de accidentalidad en el tramo a través de un procedimiento bayesiano.

El procedimiento bayesiano de estimación de la frecuencia de accidentalidad en un tramo de carretera propuesto se basa en los desarrollos de Hauer (1997) y de Pardillo (1995). La estimación de la accidentalidad combina la estimación “a priori” obtenida a partir de un modelo de regresión multivariante binomial negativo ajustado en el conjunto de tramos semejantes al que pertenece el que es objeto de la estimación y los registros de accidentalidad en el tramo.

De acuerdo con las conclusiones obtenidas en el proyecto DISCAM, los modelos de predicción calibrados y ajustados para la red en que se aplican permiten obtener una precisión aceptable para estimar las frecuencias medias de accidentes en itinerarios para períodos de una duración de cinco años o mayor. En todo caso, para obtener estimaciones de accidentalidad en períodos de predicción posteriores al de calibración deben aplicarse unos coeficientes de ajuste que reflejen las variaciones en la exposición y la tendencia de variación de la accidentalidad total en la red.

3.1. Calibración de modelos de regresión generalizados

A través de la calibración de un modelo de regresión multivariante se puede estimar la frecuencia de los accidentes en cualquier tramo de la carretera en función de sus características. Aplicando las ecuaciones resultantes del modelo ajustado se obtiene la estimación en función de los valores concretos de las variables de predicción en cada tramo de la red, tanto si es un tramo en proyecto como si es un tramo de una carretera en servicio.

En las carreteras en servicio, para cada tramo se cuenta además de la información sobre los valores de las variables de configuración de la carretera (trazado, márgenes, accesos, intersecciones, etc.) con los datos de accidentes registrados a lo largo del tiempo. En este caso se puede aplicar un método bayesiano para aprovechar toda la información disponible y mejorar la precisión de la estimación.

Los modelos de regresión generalizada permiten estimar el valor de la frecuencia de accidentes media λ en cada tramo de la red en función de una serie de variables x_i que caracterizan las condiciones de la carretera, su entorno y el tráfico, asumiéndose que:

$$\lambda = f(\{x_i\}, \{\beta_j\})$$

siendo β_j los parámetros de calibración del modelo.

Para su aplicación en una red concreta resulta conveniente calibrar modelos de regresión específicos para conseguir una mayor precisión en las estimaciones. Con este fin, se estableció un procedimiento de calibración de los modelos mediante un proceso de máxima verosimilitud en el que se selecciona como estimador los valores de los coeficientes que maximizan la probabilidad de la muestra aleatoria observada.

Se adopta la estructura de un modelo de regresión binomial negativo con una ecuación de enlace del tipo exponencial aditiva que responde a las siguientes ecuaciones de enlace:

$$P(Y = y_i) = \left\{ \Gamma(y_i + K^{-1}) / [\Gamma(K^{-1})] \right\} [K\mu_i / (1 + K\mu_i)]^{y_i} [1 / (1 + K\mu_i)]^{-K} \quad (1)$$

$$\mu_i = e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_{ij}} = e^{\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_n x_{in}} \quad (2)$$

siendo:

$P(Y = y_i)$ la probabilidad de que se produzcan y_i accidentes en el emplazamiento i

μ_i la frecuencia o tasa media de accidentes que pueden presentarse en un determinado periodo de tiempo

K el parámetro de sobredispersión común a todo el conjunto de emplazamientos de la muestra.

β_{ij} los coeficientes de regresión que corresponden a cada variable explicativa x_{ij} .

Los valores de los coeficientes de regresión y del parámetro de sobredispersión se determinan con la condición de maximización de la función logarítmica de verosimilitud de la forma estructural del modelo adoptado. La función logarítmica de verosimilitud que resulta de la forma funcional propuesta es:

$$L(\beta, K) = \sum_i \left[\left(\sum_{j=1}^{y_i} \log(1 + K j) - \log(1 + K y_i) + y_i \log \mu_i \right) - \left(y_i + \frac{1}{K} \right) \log(1 + K \mu_i) - \log(y_i!) \right]$$

Los valores de β y K que maximizan la función $L(\beta, K)$ se adoptan como coeficientes de modelo de regresión y como valor de la sobredispersión respectivamente. Introduciendo estos valores en la ecuación de predicción se puede estimar la frecuencia de accidentes en función de los valores de las variables de predicción.

En la ecuación resultante se comprueba que los coeficientes de regresión sean estadísticamente significativos y que el signo del coeficiente refleja adecuadamente la influencia de la variable en la accidentalidad.

El modelo resultante de la incorporación de una nueva variable se valora mediante el criterio de información de Akaike (AIC). El ajuste de los modelos calibrados puede valorarse mediante el análisis de residuos normalizados que permite obtener conclusiones sobre el ajuste que logran los modelos de predicción (Pardillo, Bojorquez y Camarero, 2006). Si el ajuste es adecuado el diagrama de residuos acumulados deberá “oscilar” alrededor del eje de las abscisas con escasa amplitud además de que cerrará muy próximo a cero. En los dominios donde el diagrama sea creciente el modelo subestimaré la frecuencia y en caso contrario la sobrestimaré. Por su parte un decremento o incremento pronunciado en un punto de las abscisas, indicará la presencia de un dato anormal (*outlier*) producto de un valor erróneo en la muestra, o bien, falta de ajuste del modelo obtenido. Asimismo puede ser el resultado de la presencia de datos repetitivos con una misma magnitud en la variable explicativa que se analice.

Un aspecto importante a establecer es el ámbito de aplicación de los modelos, que estará determinado por las condiciones de la población de la que se extraen las muestras empleadas en la calibración. La descripción detallada de las variables características de esta población es un complemento indispensable de los resultados.

3.2. Estimación bayesiana de la frecuencia de accidentes

La aplicación del procedimiento bayesiano permite aumentar significativamente la precisión de las estimaciones en carreteras en servicio. La estimación de la accidentalidad combina la estimación “a priori” obtenida a partir del modelo de regresión lineal generalizado binomial negativo ajustado en el conjunto de tramos semejantes al que pertenece el que es objeto de la estimación y los registros de accidentalidad en el tramo.

La ecuación de estimación de la frecuencia de accidentes es la siguiente:

$$\hat{x}_i = \alpha_i \hat{e}_i + (1 - \alpha_i) R_i$$

siendo:

\hat{x}_i : Frecuencia de accidentes estimada en el tramo i

α_i : Coeficiente de ponderación

\hat{e}_i : Estimación de la frecuencia de accidentes en el tramo i obtenida aplicando la ecuación resultante del modelo de regresión multivariante

R_i : Frecuencia de accidentes registrada en el tramo i en el período considerado para la calibración del modelo

El valor de coeficiente de ponderación es:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 + \frac{\hat{e}_i}{k}}$$

Siendo:

k = parámetro de sobredispersión del modelo de regresión multivariante.

3.3. Ajustes por las tendencias de evolución de la exposición y de las tasas generales de accidentalidad

El valor obtenido a partir de la ecuación anterior se ajustará con unos coeficientes de corrección que permitirán tener en cuenta los efectos de las variaciones de intensidad y las tendencias generales de variación de la accidentalidad del período de predicción respecto del de considerado en el ajuste del modelo de predicción multivariante y en la accidentalidad total. Los coeficientes de ajuste serán los siguientes:

a) Coeficiente de ajuste por variaciones en la exposición $K_{E,i}$

$$K_{E,i} = \left(\frac{\exp_{p,i}}{\exp_{a,i}} \right)^{C_{exp}}$$

siendo

$\exp_{p,i}$: exposición estimada en el tramo i durante el periodo de predicción (veh-km)

$\exp_{a,i}$: exposición registrada en el tramo i durante el periodo considerado para la calibración del modelo (veh-km)

C_{exp} : Coeficiente de la variable $\ln(\exp)$ en el modelo de predicción multivariante

b) Coeficiente de ajuste por variaciones en la accidentalidad total K_A

$$K_A = \frac{a}{p} \frac{\sum acv_p}{\sum acv_a}$$

siendo

$\sum acv_p$: número total de accidentes esperados en el conjunto de tramos de características semejantes durante el periodo de predicción

p: duración del período de predicción en años

$\sum acv_a$: número total de accidentes registrados en el conjunto de tramos de características semejantes durante el periodo considerado para la calibración del modelo

a: duración del período de calibración en años

3.4. Estimación del potencial de reducción de costes de la accidentalidad

El potencial de seguridad se calcula como la diferencia entre el coste de la accidentalidad por km del tramo, derivado de la accidentalidad estimada por aplicación del proceso bayesiano, y el coste esperado para carreteras con las mejores condiciones de seguridad alcanzables a través de medidas preventivas de mejora de la seguridad vial

Para la aplicación del procedimiento será necesario evaluar previamente cuales son las condiciones de seguridad alcanzables en cada categoría mediante actuaciones preventivas de mejora de la infraestructura y determinar los costes medios de accidentalidad por km en estas condiciones. Para ello cabe identificar tramos que presenten las condiciones de referencia que se establezcan y determinar los costes medios de la accidentalidad en ellos, o establecer inicialmente como referencia un percentil objetivo de la distribución de costes de la accidentalidad por km de los tramos de cada categoría y revisar este valor en función de los resultados del seguimiento de los costes de la accidentalidad en los tramos en los que se vayan desarrollando las actuaciones preventivas derivadas de análisis y en los que, por tanto, se vayan alcanzando las condiciones de referencia.

REFERENCIAS

Directiva 2008/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre gestión de la seguridad de las infraestructuras viarias. Diario Oficial de la Unión Europea de 29/11/2008

Ganneau, F. y Lemke, K.: Network safety management. From case study to application. *XXIII Congreso Mundial de Carreteras*. AIPCR, París 2007

Hauer, E (1997): *Observational Before–After Studies in Road Safety*. Pergamon Press. Oxford, Reino Unido.

Pardillo Mayora, J.M. (1995): *Desarrollo de una metodología de planificación y evaluación de actuaciones de mejora de la seguridad en la circulación con aplicación de las técnicas de análisis estadístico bayesiano* (tesis doctoral). Departamento de Ingeniería Civil-Transportes. ETSICCP, Universidad Politécnica. Madrid.

Pardillo Mayora, J.M., Bojorquez, R. and Camarero, A. (2006): Refinement of Accident Prediction Models for the Spanish National Network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1950, 65-72.

Pardillo Mayora, J.M. (2009): Clasificación de las carreteras en función de la reducción potencial de costes de la accidentalidad y aplicación a la gestión de la seguridad vial. *Actas del IV Congreso Nacional de Seguridad vial*, Logroño.

Pardillo Mayora, J.M., Jurado, R. et al (2009): *DISCAM: Herramientas para un diseño seguro de la carretera y sus márgenes. Informe final*. Universidad Politécnica de Madrid.